

kar pomeni, da za proces stanjševalnega vleka velja ravninsko deformacijsko stanje.

Torej je

$$\sigma_2 = \sigma_t = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_z + \sigma_r}{2}$$

Ravnotežna diferencialna enačba se po ureditvi glasi:

$$(\sigma_z - \sigma_s)2x dx + (x^2 - r_2^2)d\sigma_z - (x^2 - r_2^2)d\sigma_s + 2\sigma_r x dx \left(\frac{\mu_m}{\sin \alpha} + \frac{1}{\cos \alpha} - \frac{r_2 \mu_p}{x \tan \alpha} \right) = 0 \quad (1).$$

Zaradi preglednosti uvedemo dve novi označbi [3]:

$$n = \frac{r_2 + \frac{s_1 + s_2}{2}}{r_2} \quad \text{in} \quad b = \frac{\mu_m}{\sin \alpha} + \frac{1}{\cos \alpha} - \frac{\mu_p}{n \tan \alpha}$$

Ravnotežna enačba dobi obliko:

$$(\sigma_z - \sigma_s)2x dx + (x^2 - r_2^2)(d\sigma_z - d\sigma_s) + 2\sigma_r b x dx = 0.$$

Uvedemo dve novi označbi:

$$\sigma_z - \sigma_s = \sigma_h \quad \text{in} \quad d\sigma_z - d\sigma_s = d\sigma_h.$$

Iz pogoja plastičnosti

$$\sigma_1 - \sigma_3 = B\sigma_f \quad \text{oziroma}$$

$$\sigma_h - (-\sigma_r) = B\sigma_f$$

lahko izrazimo σ_r

$$\sigma_r = B\sigma_f - \sigma_h.$$

Po ureditvi in upoštevanju robnih pogojev lahko zapišemo:

$$\int_{R_1}^{R_x} \frac{2x dx}{r_2^2 - x^2} = \int_{\sigma_s}^{\sigma_h} \frac{d\sigma_h}{\sigma_h(1-b) + bB\sigma_f}$$

Z rešitvijo integralov in upoštevanjem, da je napetostni koeficient za ravninsko deformacijsko stanje

$2/\sqrt{3} \approx 1,15$, je napetost v vzdolžni smeri preoblikovalne cone:

$$\sigma_{hRx} = \frac{1}{b-1} \left\{ \left(\frac{A_x}{A_1} \right)^{b-1} [\sigma_s(b-1) - 1,15 b \sigma_{fsr}] + 1,15 b \sigma_{fsr} \right\} \quad (2).$$

Na koncu preoblikovalne cone pa je napetost

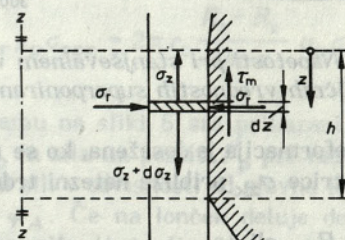
$$\sigma_{hRx=R_2} = \sigma_{z0} = \frac{1}{b-1} \left\{ \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^{b-1} [\sigma_s(b-1) - 1,15 b \sigma_{fsr}] + 1,15 b \sigma_{fsr} \right\} \quad (3).$$

Če na rob lončka ne deluje nobena sila, je napetost $\sigma_s = 0$ in preide zgornja enačba v znano enačbo za izračun napetosti pri stanjševalnem vleku [3]:

$$\sigma_z = 1,15 \frac{b \sigma_{fsr}}{b-1} \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^{b-1} \right].$$

Po preoblikovanju se napetost na valjastem delu povečuje zaradi trenja med obdelovancem in matrico (sl. 3). Ravnotežno enačbo za ta del lahko zapišemo:

$$\sigma_z A_2 - (\sigma_z + d\sigma_z) A_2 + \tau_m 2\pi R_2 dz = 0 \quad (4).$$



Sl. 3. Napetosti v valjasti coni.

Z upoštevanjem pogoja plastičnosti in robnih pogojev dobimo:

$$\int_{\sigma_{z0}}^{\sigma_{zz}} \frac{d\sigma_z}{B\sigma_f - \sigma_z} = \int_0^z \frac{2\pi R_2 \mu_m dz}{A_2}$$

Po rešitvi integralov lahko zapišemo, da se vzdolžna napetost v valjastem delu spreminja po zakonu

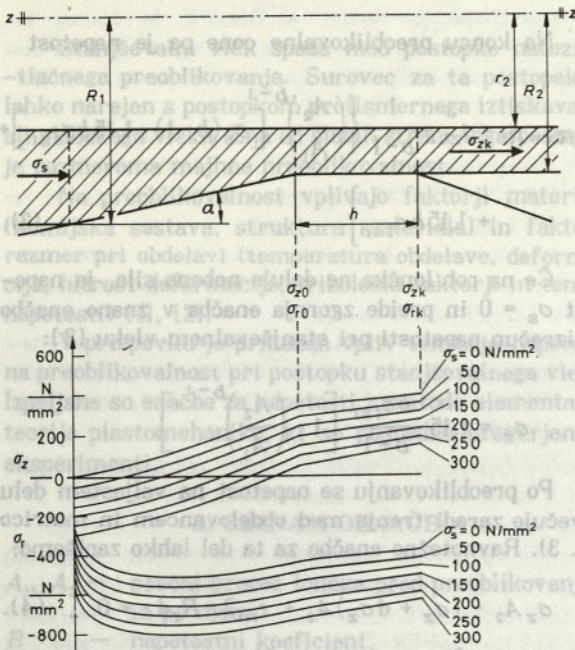
$$\sigma_{zz} = 1,15 \sigma_f - (1,15 \sigma_f - \sigma_{z0}) e^{(-2\pi R_2 \mu_m z)/A_2} \quad (5).$$

Na mestu, kjer vlečenec izstopa iz matrice, pa sta napetosti:

$$\sigma_{zk} = 1,15 \sigma_f - (1,15 \sigma_f - \sigma_{z0}) e^{(-2\pi R_2 \mu_m h)/A_2} \quad (6).$$

$$\sigma_{rk} = - (1,15 \sigma_f - \sigma_{z0}) e^{(-2\pi R_2 \mu_m h)/A_2} \quad (7).$$

Na sliki 4 je prikazan diagram napetosti pri različnih velikostih superponirane sile, dobljen z računalniškim simuliranjem preoblikovalnega procesa. Iz diagrama se vidi, da se z večanjem superponirane napetosti zmanjšuje vzdolžna napetost σ_{zk} , od katere je odvisna mejna deformacija.



Sl. 4. Napetosti pri stanjševalnem vleku pri različnih vrednostih superponirane sile.

Mejna deformacija je dosežena, ko se napetost na izhodu iz matrice σ_{zk} približa natezni trdnosti [4]:

$$\sigma_{zk} < R_m \text{ ali}$$

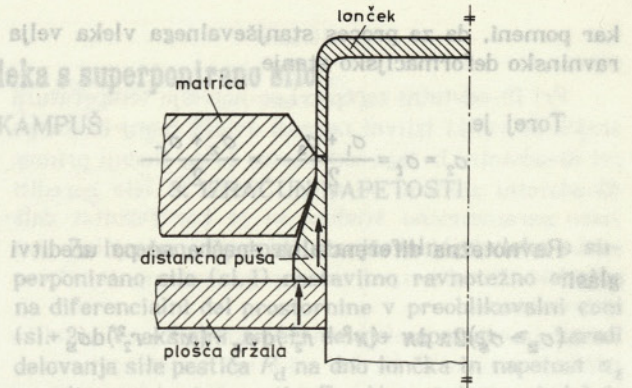
$$1,15 \sigma_f - (1,15 \sigma_f - \sigma_{z0}) e^{(-2\pi R_2 \mu_m h)/A_2} < R_m \quad (8).$$

4. POTRDIITEV TEORETIČNIH IZRAČUNOV Z EKSPERIMENTI

Pravilnost izpeljanih enačb za napetosti pri stanjševalnem vleku s superponirano silo smo preverjali preko enačbe za določitev mejne deformacije (8). Vnaprej izdelani lončki so bili izdelani s postopkom globokega vleka brez zadrževala pločevine. Superponirana sila je delovala na rob lončka prek distančne puše (sl. 5). Plošča zadrževala je bila povezana preko distančnih drogov s hidravlično blazino stiskalnice.

Del lončkov je bil narejen iz pločevine Č. 1121, debeline 5,15 mm, del pa iz pločevine Č. 4321 debeline 6 mm. Lončki so bili po globokem vleku žarjeni, fosfatirani in namiljeni. Preoblikovalne lastnosti materiala so podane v preglednici 1.

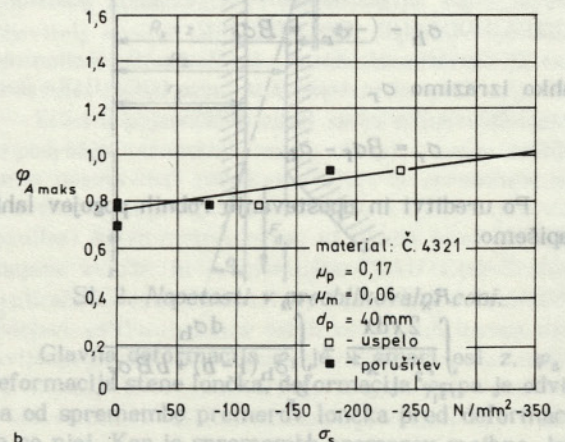
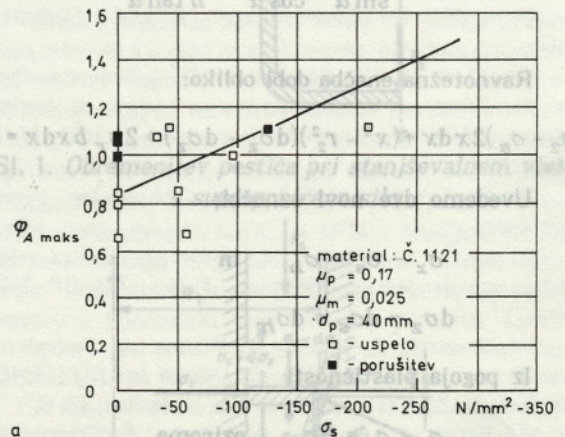
Pri preoblikovanju lončkov se je izkazalo, da je brez delovanja superponirane sile kritični del stanjševalnega



Sl. 5. Prenos superponirane sile iz plošče držala z distančno pušo.

valnega vleka začetek preoblikovanja. Do porušitve je prišlo pri dnu lončka na prehodu iz zaokroženega v ravni del.

Če se lonček iz materiala Č. 1121 na začetku ni pretrgal, je bila največja deformacija na robu lončka, ki je bil zaradi operacije globokega vleka odebeljen, $\varphi_A = 0,8$ (0,85). Že z manjšo superponirano silo je bila dosežena največja dosegljiva deformacija orodja $\varphi_A = 1,12$ (sl. 6a).



Sl. 6. Primerjava glavne mejne deformacije $\varphi_{A \text{ maks}}$ v odvisnosti od velikosti superponirane napetosti σ_s .

Pri vleku lončkov iz materiala Č.4321 je bila dosežena mejna deformacija brez superponirane sile $\varphi_A = 0,7$, s superponirano silo 200 kN pa $\varphi_A = 0,937$ (sl. 6b).

Preglednica 1: Preoblikovalne lastnosti materiala preoblikovancev

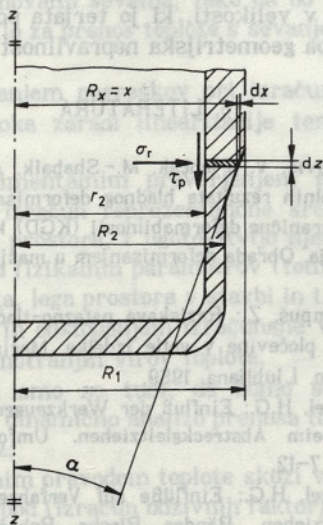
Material	C N/mm ²	n
Č.1121	689	0.21
Č.4321	1588	0.192

5. SILA PREOBLIKOVANJA

Celotna preoblikovalna sila F_d je po sliki 1 [2], [3]:

$$F_c = F_p + F_s = F_d + F_{tp} + F_s.$$

Sila trenja lončka ob pestič je odvisna od koeficienta trenja med lončkom in pestičem, radialne napetosti v coni preoblikovanja in površine preoblikovalne cone. Ravnotežna enačba, nastavljena na diferencialni prostornini v preoblikovalni coni (sl. 7) se glasi:



Sl. 7. Napetosti v preoblikovalni coni.

$$dF_{tp} = \tau_p dA,$$

kjer je

$$\tau_p = \mu_p \sigma_r.$$

Iz pogoja plastičnosti lahko zapišemo, da je radialna napetost:

$$\sigma_r = \sigma_{rRx} = \sigma_{hRx} - B\sigma_f = \frac{1}{b-1} \left\{ \left(\frac{A_x}{A_1} \right) \right\}^{b-1} \times$$

$$\times \left[\sigma_s(b-1) - 1,15b\sigma_{fsr} \right] + 1,15b\sigma_{sr} \} - 1,15\sigma_f \quad (9),$$

$dA = 2\pi r_2 dz$; ker je $\tan \alpha = \frac{dx}{dz}$, lahko zapišemo

$$dA = 2\pi r_2 \frac{dx}{\tan \alpha}.$$

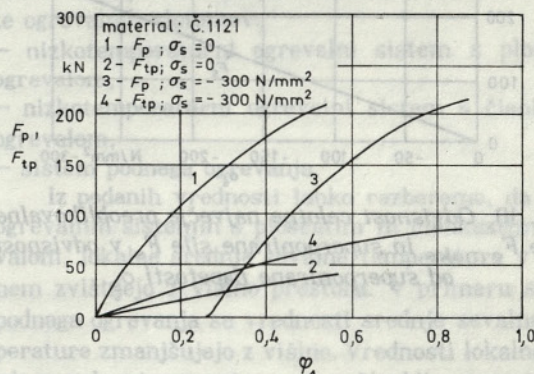
Sila trenja je torej

$$F_{tp} = \frac{2\pi r_2 \mu_p}{\tan \alpha} \int_{R_2}^{R_1} \left\{ \frac{1}{b-1} \left\{ \left(\frac{x^2 - r_2^2}{R_1^2 - r_2^2} \right)^{b-1} \left[\sigma_s(b-1) - 1,15b\sigma_{fsr} \right] + 1,15b\sigma_{sr} \right\} - 1,15\sigma_f \right\} dx \quad (10)$$

in jo izračunamo kot zmnožek srednje radialne napetosti v preoblikovalni coni in površine lončka, ki pritiska na pestič:

$$F_{tp} = A_{tr} \mu_p \sigma_{rsr} = 2\pi r_2 \frac{R_1 - R_2}{\tan \alpha} \mu_p \sigma_{rsr} \quad (11).$$

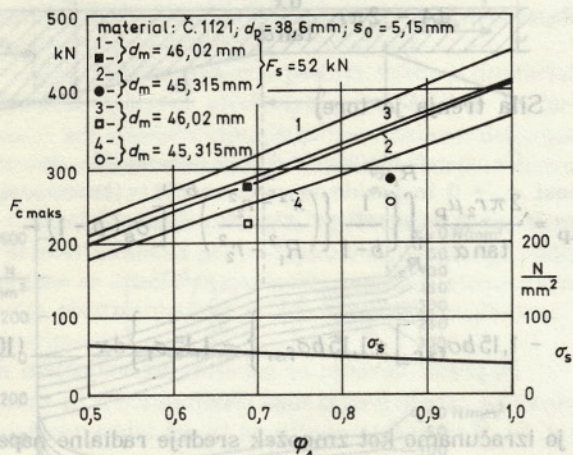
V diagramu na sliki 8 sta prikazani sili trenja ob pestič F_{tp} in sila na pestič F_p pri različni veliki superponirani sili v odvisnosti od glavne logaritmske deformacije φ_A . Če na lonček deluje dovolj velika superponirana sila (krivulja 3), in je deformacija majhna (0,25), lahko že sama superponirana sila povzroči preoblikovanje lončka. Napetostno-deformacijsko stanje je enako kakor pri procesu iztiskovanja. V tem primeru stena lončka med preoblikovalno cono in dnom lončka ni obremenjena, sila pestiča $F_p = 0$. Pestič je obremenjen šele pri večjih deformacijah.



Sl. 8. Sila trenja ob pestiču F_{tp} in celotna sila F_p na pestič v odvisnosti od logaritmske deformacije φ_A pri različni veliki superponirani sili.

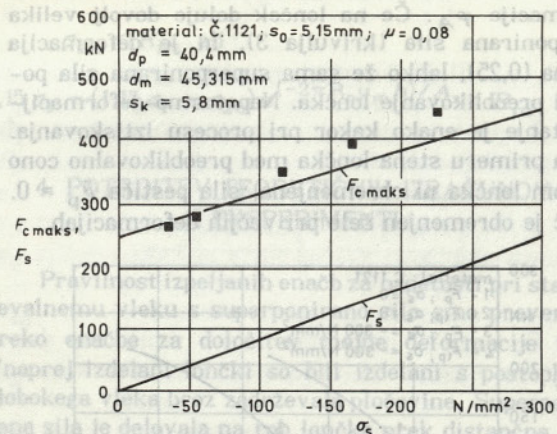
6. PRIMERJAVA TEORETIČNE SILE Z DEJANSKO

V diagramu na sliki 9 je narejena primerjava med največjim teoretičnim in dejanskim potekom preoblikovalne sile, neobremenjenih in obremenjenih lončkov iz materiala Č.1121 s superponirano silo $F_s = 55 \text{ kN}$ pri različnih deformacijah. V spodnjem delu je narisana krivulja superponirane napetosti, ki se spreminja zaradi različnega prereza A_1 .



Sl. 9. Celotna največja sila $F_{c \text{ maks}}$ in superponirana napetost σ_s v odvisnosti od glavne logaritemske deformacije ϕ_A .

Na sliki 10 pa je prikazano, kako se celotna sila na pestič pri enaki deformaciji z večanjem superponirane sile zvečuje.



Sl. 10. Odvisnost celotne največje preoblikovalne sile $F_{c \text{ maks}}$ in superponirane sile F_s v odvisnosti od superponirane napetosti σ_s .

7. SKLEP

V primerjavi z običajnim stanjševalnim vlekom smo na podlagi računalniško podprtega modela in preizkusov ugotovili:

- Superponirana sila povečuje mejno deformacijo. Pri preoblikovanju lončkov, izdelanih s postopkom globokega vleka, je teoretično izpeljano in eksperimentalno potrjeno, da se s superponirano silo lahko poveča mejna deformacija ϕ_A za 40 odstotkov. Pri preoblikovanju lončkov, na katere je delovala superponirana sila le v začetni fazi preoblikovanja, je bilo eksperimentalno ugotovljeno, da se je mejna deformacija povečala za 25 odstotkov pri hkratni povečani zanesljivosti.

- Superponirana sila poveča geometrijsko natančnost vlečencev. Pri običajnem stanjševalnem vleku smo s preizkusi ugotovili, da se pri večjih deformacijah (zaradi postrani potegnjenega lončka s postopkom globokega vleka) lahko izoblikuje neraven rob lončka. Poleg tega, da je stopnja izkoriščenosti materiala manjša, je zaradi elastičnih deformacij orodja zgornji del lončka po premeru nenatančen. Pri snemanju lončkov iz matrice pa lahko pri večjih deformacijah snemalna sila povzroči deformacijo stene (ušesa). Že pri manjši superponirani sili ostane rob lončka raven in pri snemanju ni dodatnih deformacij.

- Z večanjem superponirane sile se povečujeta preoblikovalna sila in energija, zmanjšuje pa preoblikovalni izkoristek. Zato naj se superponirana sila odmerja le v velikosti, ki jo terjata potrebna deformacija ali pa geometrijska nepravilnost lončka.

8. LITERATURA

- [1] Vujevič. V.-Plančak. M.-Shabaik. A.H.: Koriščenje eksperimentalnih rezultata hladnog deformisanja za odredjivanje krive granične deformabilnosti (KGD) kao funkcije naponskog stanja. Obrada deformisanjem u mašinstvu. Novi Sad 1987.
- [2] Kampuš. Z.: Raziskava natezno-tlačnega preoblikovanja debele pločevine v votle izdelke. Magisterij. Fakulteta za strojništvo. Ljubljana. 1989.
- [3] Nagel. H.G.: Einfluß der Werkzeuggeometrie auf die Verfahren beim Abstreckgleitziehen. Umformtechnik (16) 1982/3. str. 7-12.
- [4] Nagel. H.G.: Einflüsse auf Verfahrensgrenzen beim Abstreckgleitziehen. Bänder Bleche Rohre 1984/9. str. 221-223.

Avtorjev naslov: asist. mag. Zlatko Kampuš, dipl. inž. Fakulteta za strojništvo v Ljubljani